

入力波の卓越振動数が不整形地盤の最大軸ひずみに及ぼす影響

九州大学大学院 学生会員 内海寿紀 九州大学工学研究院 正会員 古川愛子
九州大学工学研究院 フェロー 大塚久哲

1. はじめに

地震発生時、線状構造物の軸線方向に層厚や剛性が変化する不整形地盤では地盤変位も軸線方向で一様でないため、成層地盤より大きな地盤ひずみが生じ、線状構造物が受ける断面力も大きくなる。不整形部に生じる断面力を考慮する方法として、共同溝設計指針¹⁾では、地盤の固有周期が最も短い地点と最も長い地点における固有周期差に依存した割増し係数を乗ずることとしている。しかし、入力波の振動特性によって地盤の応答は異なるので、地盤側の情報(固有周期差)のみに基づく割増し係数は万能でないと考えられる。本研究では、地震動の代わりに Ricker Wavelet を用いて入力波の卓越振動数が不整形地盤の応答に及ぼす影響について検討を行った。また、提案済の最大軸ひずみ推定手法の精度を入力波の卓越振動数毎に検証した。

2. 有限要素解析による軸ひずみの算出

(1) 解析概要

不整形地盤のモデルとして、図1に示す基盤面段差型モデルの2次元有限要素解析を実施した。トンネル設置深さを地表面からの深さが5mの地点とした。深い側の地盤の層厚を $H=50\text{m}$ 、浅い側の地盤の層厚を $h=20\text{m}$ 、傾斜幅を $L=100\text{m}$ とした。媒質のせん断波速度を $VS=50, 100, 150, 200\text{m/s}$ の4通りに設定し、それぞれ $VS50, VS100, VS150, VS200$ のモデルと呼ぶこととする。地盤の単位体積重量は $\rho=19\text{kN/m}^3$ 、ポアソン比は $\nu=0.45$ とし、減衰は有効質量比の卓越する2つのモードの減衰定数を10%とするレーリー減衰を採用した。境界条件は、底面を固定、側方は鉛直方向固定、水平方向自由とした。メッシュ幅は上下・水平方向ともに1m、積分時間間隔は0.005秒とした。入力波は式(1)で表される Ricker Wavelet を用いた。入力波の卓越振動数($=\alpha/\pi$)は表1に示す4つの地盤の両端の水平部分の1次固有振動数とし、入力波は最大値が100galとした(図2)。

$$f(t) = \frac{\alpha}{2\sqrt{\pi}} \left[1 - 2\alpha^2(t-t_0)^2 \right] e^{-\alpha^2(t-t_0)^2} \quad (1)$$

(2) 最大軸ひずみ発生時ひずみ分布

図3に $VS100$ のケースの最大軸ひずみ発生時のひずみ分布、図4に変位分布を示す。いずれのせん断波速度のケースも深い側の地盤の固有振動数と Ricker Wavelet の卓越振動数が一致するときにひずみ、両端の変位差が最大となった。また、入力波の卓越振動数の値が深い側の地盤の固有振動数に近づくほど応答が大きくなっている。浅い側の地盤の固有振動数が最大軸ひずみに与える影響は、特に見られなかった。

(3) 軸ひずみ時刻歴波形

最大軸ひずみは入力波の卓越振動数と深い側の地盤の固有振動数に影響されることがわかった。そこで、軸ひずみの時刻歴波形にも振動数による影響があるのではないかと考え、振動数による場合分けを実施した。まず、深い側の地盤の固有振動数を f_1 、浅い側の地盤の振動数を f_2 、Ricker Wavelet の卓越振動数を f_R とする。これらの振動数の関係から $A(f_1 < f_R)$ 、 $B(f_1 = f_R)$ 、 $C(f_2 \leq f_R < f_1)$ 、 $D(f_R < f_2)$ の4つのグループに場合分けを行った(表2)。

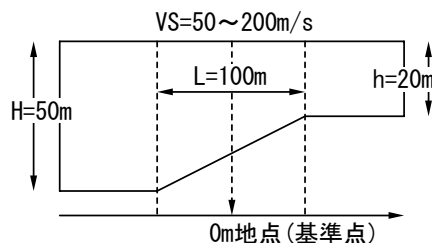


図1 基盤面段差型モデル

表1 1/4波長則による地盤の1次固有振動数(Hz)

地盤モデル	深い側の地盤	浅い側の地盤
VS50	0.25	0.625
VS100	0.5	1.25
VS150	0.75	1.875
VS200	1	2.5

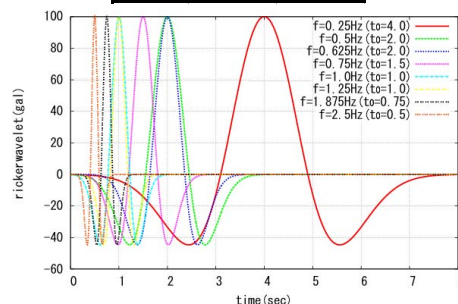


図2 入力波

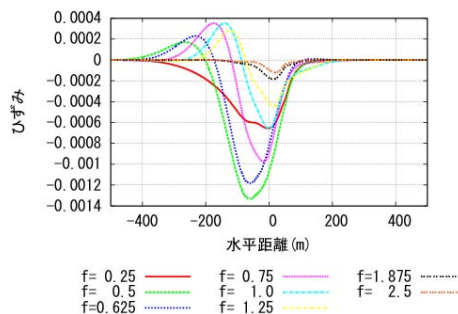


図3 最大軸ひずみ発生時ひずみ分布($VS100$)

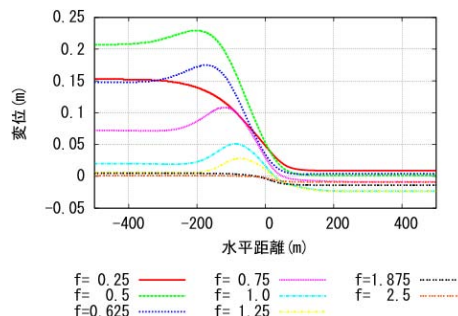


図4 最大軸ひずみ発生時変位分布($VS100$)

グループ A (図 5(a)) について、ひずみの時刻歴波形は入力波と同じような波形となり、入力波と同じ応答を示している。グループ B (図 5(b)) について、深い側の地盤の固有振動数と入力波の卓越振動数が一致するときは、共振して振幅が大きくなっていることが確認できる。最大値をとる時刻について、 $f=0.5\text{Hz}$ のとき入力波は 2 秒に最大となるが、ひずみ波形は 2 秒を少し過ぎたところで最大値をとっていることから入力波とのずれが見られた。グループ C (図 5(c)) について、グループ B と同じような波形を示し、また最大値をとる時刻のずれも見られたが、グループ B ほど応答は大きくない。グループ D (図 5(d)) について、波形は少しいびつな形状となり、深い側の地盤の固有振動数に比べ入力波の卓越振動数が低いことから、応答が非常に小さい。

(4)最大軸ひずみ

図 6(a)に有限要素法(FEM)による振動数毎の最大軸ひずみを示している。2.(2)で述べたように、 f_1 と f_R が一致するときに各せん断波速度 VS で軸ひずみが最大となっており、 f_R が f_1 に近づくにつれてひずみが大きくなっているのが確認できる。

3.最大軸ひずみの簡易推定に関する検討

次に提案済の最大軸ひずみの簡易推定手法²⁾の精度を検証する。本手法は「不整形性によって生じる速度差が生む運動エネルギーが、地盤が軸方向にひずむことによるひずみエネルギーで受け持たれる」というエネルギー保存を仮定し、モデル両端の速度応答差を不整形部に生じる軸ひずみに変換するものである。速度差によって地盤に与えられる単位面積あたりの運動エネルギーを K 、ひずみエネルギーを S とする。 K と S は、軸方向の速度分布を正弦関数で、ひずみ分布を余弦関数で近似することによって深さ毎に求める。これらが等しい ($K=S$) ことから、最大ひずみ $\epsilon_{\max}$ の推定式は最大速度応答差 ΔV から式(2)のように関係づけられる。

$$\epsilon_{\max} = -\frac{\sqrt{3\pi-8}}{2\sqrt{2\pi(1+\nu)}} \frac{\Delta V}{Vs} \quad \left(\because K = \frac{\rho \Delta V^2 \lambda}{32} \left(3 - \frac{8}{\pi}\right) \quad S = \frac{(1+\nu)\rho Vs^2 \epsilon_{\max}^2 \lambda}{4} \right) \quad (2)$$

重複反射理論(SHAKE)に基づき、両端の水平地盤を 2 つの 1 次元成層地盤としてモデル化し、速度応答の最大値 ΔV を求め、式(2)から最大軸ひずみを推定する。図 6(b)に推定式により求めた最大軸ひずみを示す。FEM の結果 (図 6(a)) と比較すると、推定式は VS50 のケースのひずみを過大評価してはいるが、全体的にグラフの形状が似ており、振動数による最大軸ひずみの傾向はとらえられている。

4.まとめ

本研究では、Ricker Wavelet を用いて卓越振動数による不整形地盤の応答について検討を行った。基盤面段差型不整形地盤において、地盤の応答 (軸ひずみ、変位差) は深い側の地盤の固有振動数が入力波の卓越振動数に近いほど大きくなり、一致したときに最大となる。速度差による最大軸ひずみの推定について、振動数による傾向はとらえられているが、2.(3)で示したように、振動数によって軸ひずみの時刻歴波形の形状が異なるので、推定精度向上のためには場合分けによる補正係数の導入が必要であると思われる。今後場合分けによる補正係数の決定方法について、検討を進める予定である。

参考文献 1)(社)日本道路協会, 共同溝設計指針, 1986. 2)古川愛子, 大塚久哲, 内海寿紀, エネルギー保存を仮定した不整形地盤の地震時最大軸ひずみの簡易推定に関する検討, 地震工学論文集, 2009

表 2 振動数による場合分け

地盤	入力波の卓越振動数(Hz)							
モデル	0.25	0.5	0.625	0.75	1	1.25	1.875	2.5
VS50	B	C		D				
VS100	A	B	C			D		
VS150	A			B	C		D	
VS200	A				B	C		

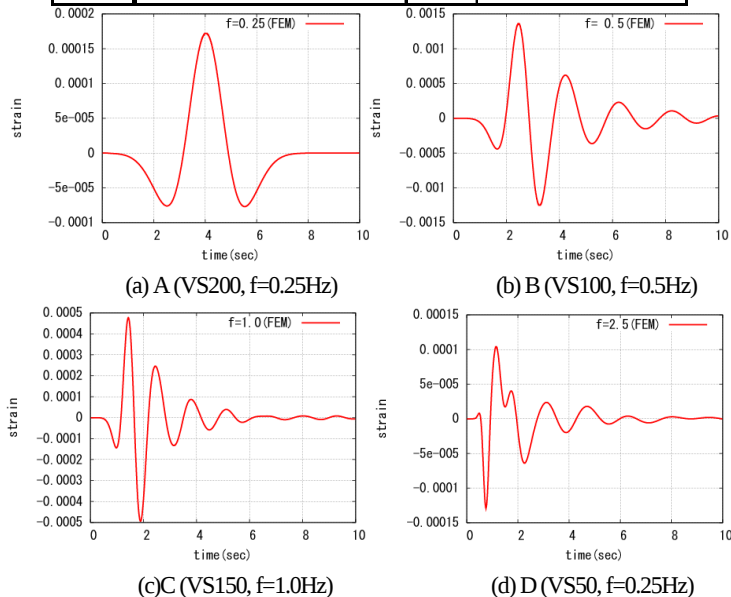


図 5 ひずみの時刻歴波形

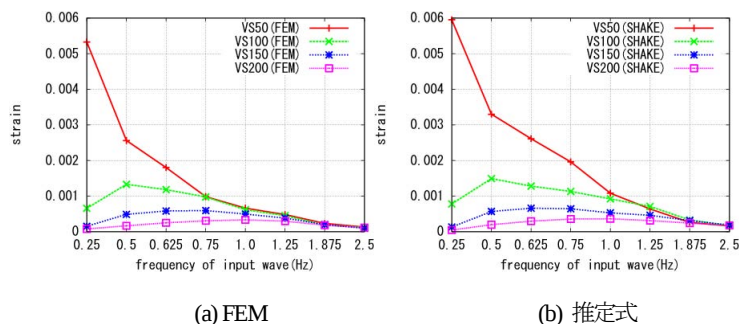


図 6 最大軸ひずみ